

**特集** 量子情報

# 電子スピンの量子コヒーレンスと量子もつれ

理化学研究所創発物性科学研究センター 量子機能システム研究グループ 研究員  
理化学研究所創発物性科学研究センター 量子機能システム研究グループ グループディレクター  
東京理科大学 物理学専攻 客員教授

なかじま  
**中島**  
たるちゃ  
**樽茶**

たかし  
**峻**  
せいご  
**清悟**

## はじめに

微細加工技術の進展によって、量子ドットと呼ばれる小さい半導体の入れ物に電子を1個単位で閉じ込めることができるようになりました。最近では、その技術を利用して、電子1個の持つ電荷やスピンの量子力学的性質を新しい情報素子へと応用する研究が進んでいます。電子のスピンは自然な二準位系（上向きと下向きのスピン）であり、量子力学を適用すると、両者が同時に存在するような状態（重ね合わせ）を作ることができます。これが量子力学的な情報（量子情報）の単位、量子ビットです。また、このような量子ビットが複数個あると、それぞれが独立ではなく、一部、あるいはすべてが連携している場合があります。これを量子力学的な相関がある状態、量子もつれと呼びます。最近、インターネットや新聞紙上で量子コンピュータという言葉の時折見かけますが、このコンピュータでは、量子ビットと量子もつれの操作を組み合わせることによって計算が行われます。この意味で、量子重ね合わせと量子もつれは量子コンピュータの動作原理を与える基本概念と言えます。

ただし、この基本概念が成り立つには条件として量子力学的なコヒーレンス（波としての干渉性）が保たれている必要があります。しかし、固体中の電子は、後述するように、強い相互作用のために、コヒーレンスが崩れやすくなっています。したがって、このコヒーレンスを保持するには、何らかの工夫が必

要です。例えば、多数の電子が集団としてコヒーレンスを保つ超伝導現象を利用して、超伝導体の回路で構成される量子コンピュータが研究開発されています。一方、スピンに関しては、半導体量子ドットの中の1個の電子に対してコヒーレンスが保たれるような工夫を施して、様々な研究が行われています。

本稿では、まず、量子ドット中の電子スピンに対する量子コヒーレンスの性質とその量子ビットへの影響について説明します。次に2個の電子スピンで作られる量子もつれの性質、特に大きな特徴とされる、空間的な非局所性を制御する実験を2つ紹介します。

## 量子コヒーレンス

重ね合わせや量子もつれの状態は、波で定義されるような「位相」によって記述されます。これらの状態を制御し利用するには、この位相が勝手に変化したりすることなく再現できる必要があります。前述の量子コヒーレンスは、この位相の再現性の良さを示すもので、量子状態の質を表す指標と言えます。

通常、私たちが日常生活の中で上記のような量子効果を体験することはほとんどありません。それは、環境との相互作用により量子系のコヒーレンスが失われる「デコヒーレンス」が起こるからです。電子スピンを量子ビットとして利用するためには、このデコヒーレンスをいかにして抑制するか、ということが大きな技術課題となっています。

ここで量子ドット中の電子スピンのデコヒ

ーレンスについて考えてみましょう。スピンとは個々の電子が持つ磁気モーメントのことで、電場と直接結合しません。半導体を含めあらゆる固体デバイス中では不純物や欠陥に由来する電氣的雑音が避けられませんが、スピンはこのような雑音環境と結合しないため、デコヒーレンスも起こりにくいのです。

一方で、電子スピンと磁氣的な雑音との結合は決して無視できません。電子スピンの場合には核スピンとの接触超微細相互作用に由来する磁気雑音が大きな影響を及ぼします。量子ドットデバイスの材料としてよく利用されるガリウム砒素 (GaAs) の場合は、天然同位体の大半を占める  $^{69}\text{Ga}$ ,  $^{71}\text{Ga}$ ,  $^{75}\text{As}$  が核スピン  $3/2$  を有しています。一つの電子スピンと接する  $10^5 \sim 10^6$  個の核スピン一つ一つがランダムに向きを変える磁石のように振る舞うため、雑音源になるわけです。

この磁気雑音を抑制するための有効な方法の一つは、量子ドットデバイスの材料として、核スピン自由度を持たない半導体を使うことです。実は産業的に広く使われているシリコン (Si) では、天然同位体比の 4.7% を占める  $^{29}\text{Si}$  を除いて核スピンを持っていません。さらに同位体制御によって核スピンを持たない  $^{28}\text{Si}$  だけの半導体基板を作れば、ほぼ磁気雑音のないクリーンな環境を得ることができます。従来このような材料で量子ドットデバイスを作製することは難しかったのですが、近年徐々にそれが可能になってきました。GaAs では 10 ナノ秒程度であった電子スピンのコヒーレンス時間が、その 1,000 倍を超える 20 マイクロ秒以上に改善されてきています。

核スピンの少ない半導体基板を使うのは、いわば雑音を完全にシャットアウトするために防音室の中で音楽を聴くようなものですが、別の方法として、ノイズキャンセリングヘッドフォンを最近よく見かけるようになりました。その仕組みはマイクを使って雑音を

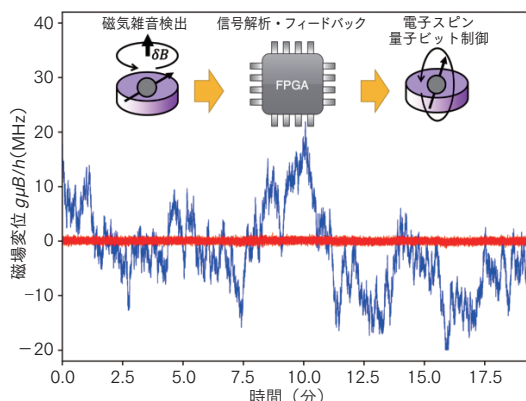


図1 電子スピンによって検出された磁気雑音(青)とフィードバックによる抑制効果(赤)

測定しながら逆位相の音を出すことで雑音を動的に打ち消すというものですが、同様の機構を量子状態の制御にも利用することができます。電子スピンは磁気センサーとして応用されるほどに高感度に磁場を検出できるので、これを使って磁気雑音を測定し、その効果を打ち消すようにうまくフィードバックして量子状態を制御してやれば良いのです(図1)。これによって、GaAs 量子ドットのコヒーレンス時間を 30 倍も改善できることが分かりました。さらに、大きな磁氣的雑音に埋もれて見えていなかった電氣的雑音の影響があることも明らかになりました。これまでは磁気雑音さえ抑制すればコヒーレンスを改善できると考えられてきたのですが、電氣的雑音に耐性のあるデバイス構造や制御方法の工夫も研究していく必要があります。

### 多重量子ドット量子もつれの生成と制御

スピン一重項は 2 個の電子スピンで作られる典型的な量子もつれ状態であり、

$$|S\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)$$

という状態ベクトルによって表されます。この式は左の矢印が示す 1 目目のスピンの上向き(下向き)であれば右の矢印が示す 2 目

のスピンは下向き（上向き），という量子もつれが形成されていることを意味します。このスピン一重項は，2個の電子が同一の空間的な軌道を占有するときには自然に形成され（パウリの排他原理），量子ドットに2電子を入れてやれば簡単に作ることができます。

ただし，同じ場所にいる2個の電子が量子もつれを形成していても，特段興味深い現象は現れません。量子もつれのユニークさは，2個のスピンの空間的に離れていても相関を持ち続けるという「非局所性」にあるからです。それでは空間的に離れた2スピンの量子もつれはどうすれば作ることができるでしょうか。量子ドットデバイスでは，ゲート電極にかける電圧を制御することによって量子ドット中に入る電子数を変化させることができます。そこでまず一つの量子ドットに2個の電子を詰めてスピン一重項を作ってから，電圧を制御して一つの電子を隣の量子ドットに移動させてやれば，量子もつれ状態を空間的に分離させることができます。量子もつれを保つためには，コヒーレンス時間以内の高速かつ精確な電圧制御が必要です。

このようにして2つの量子ドットに分離されたスピン一重項はもはやエネルギー固有状態ではないため，そのままの状態に留まることはできません。二つの量子ドット間に生じたわずかな磁場差によって，スピンの状態は一重項 $|S\rangle$ （前述）と三重項 $|T\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle)$ の間で振動するようになります。この振動の様子は，スピン一重項を分離したのと逆の過程を使うことにより測定することができます。つまり，ある時刻にスピン一重項になっていれば2個の電子が元の量子ドットに戻ってくることができますが，三重項になっていれば戻ってくることができない（スピン閉塞現象）ので，スピン状態の違いを電荷信号に変換して捉えることができます。このような振動がコヒーレンス時間の間だけ継続する様子を測定することで，量子もつれ状

態ができていることが確認できます（図2）。

さらに分離した電子スピンの一方をその隣にいる第三のドットの電子スピンと交換する操作を使うことによって，隣り合わない電子スピン同士の量子もつれを作ることができます（図2）。このような操作は電氣的雑音の影響を受けやすいはずなのですが，興味深いことに，雑音をうまく使うことでコヒーレントな量子もつれ状態を維持できることも分かりました。このようにして，多数の量子ドット中の電子スピン間で自在に量子もつれを生成することが可能になります。

### 超伝導体を用いた量子もつれの空間分離

一般に超伝導体は低温で電気抵抗が零になる導体として知られています。超伝導体中の電子は2個の対（クーパー対）をなしており，スピンは一重項の状態にあります。このクーパー対を空間的に分離することにより，非局所的な性質を持つ，もつれ粒子対（Andreev エンタングラー）を実現することができます。このような非局所のもつれ粒子対は，光子や原子では早くから作られており，量子テレポーテーションなど量子情報の重要なリソースとして利用されています。しかし，固体系で研究が始まったのは最近の話です。まず，1つの超伝導体の電極から2つの量子ドットへクーパー対を分離トンネルさせる実験が報告されました。この分離トンネルではクーパー対が片方のドットへ直接トンネルすることを妨げるために，量子ドットの電子間に生じる反発エネルギー（帯電エネルギー）が利用されました。この実験によってもつれ電子対を空間分離できることは分かりましたが，分離した電子対がコヒーレンスを保っていることは確認できませんでした。

このコヒーレンスを調べられる素子として，私たちは，2つの近接させた量子ドットを2つの超伝導体の電極の間に挟み込んだ素子，並列量子ドットジョセフソン接合を提



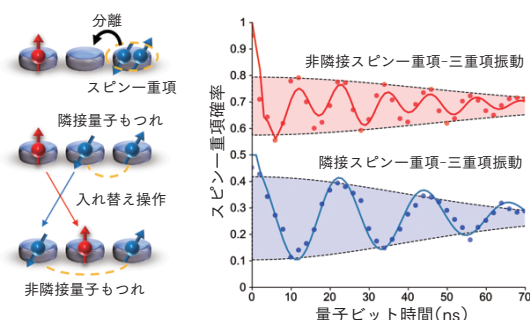


図2 隣接・非隣接電子スピンによる  
スピン三重項-三重項間のコヒーレント振動

案、作製しました（図3）。この素子では、超伝導体中のクーパー対の電子は2つの量子ドットへ空間的に分離し、他方の超伝導体で再会合します。この過程を通してコヒーレンスが保たれている場合に限り、ジョセフソン接合を流れる超伝導電流が検出されます。実験には、図3に示すように、アルミニウム（Al）の超伝導電極とインジウム砒素（InAs）の量子ドット2個からなるジョセフソン接合を用いました。各量子ドットのエネルギー準位を調整し、超伝導電極のフェルミエネルギーに共鳴させたときの超伝導電流を測定したところ、両方の量子ドットが同時に共鳴したときのみ、クーパー対の空間分離トンネルによる超伝導電流が観測されました。さらに最近では、InAs量子ドットを短いInAsナノ細線で置き換えた素子を作製し、より高い効率のクーパー対分離による超伝導電流を観測しました。ナノ細線の場合には、クーパー対の片方の細線への直接トンネルは、量子ドットの場合と異なり、細線の中の一次元電子系の強い相互作用によって抑えられます。さらに良いことに、この相互作用は、細線を伝搬する一次元電子のモード数をゲート電圧で調整することにより、自在に変えられることが分かりました。

以上の実験は、超伝導体を源として、空間的に分離した半導体量子ドット、あるいは量子細線にスピンの量子もつれ対をオンデマン

## 超伝導体(クーパー対) 2重量子ドット

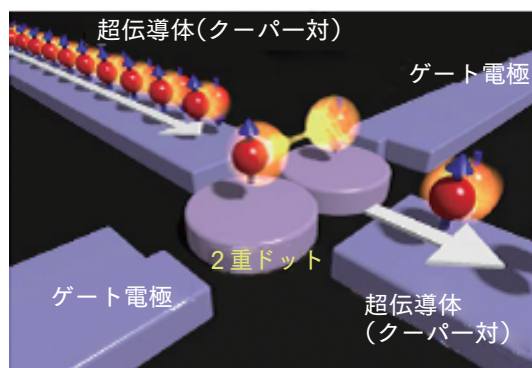
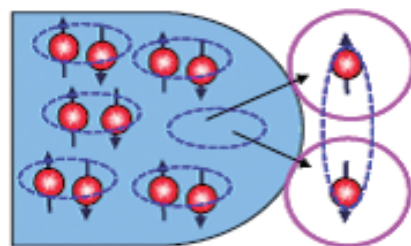


図3 並列量子ドット-超伝導体接合における  
クーパー対分離トンネル過程(上)と  
超伝導電流の生成過程(下)

ドに供給できることを意味しています。

## おわりに

量子ドットデバイスでは、単一量子ドットの単一電子を用いて一つの量子ビット、二重量子ドットの2電子を用いて量子もつれが作られます。量子コンピュータの主な論理演算は、両者をコヒーレンスが保持されている時間内に操作することによって実行されます。本稿は、その中心概念である量子コヒーレンスと量子もつれに焦点を当てました。

最近では、Siの量子ドットを用いた量子コンピュータの開発が積極的に進められています。すでに、単一量子ゲート、2量子ビットゲート、読み出しといった基本的な操作は、高精度で実行できることが示されています。さらに、ここに集積化技術を導入することにより規模の大きい量子コンピュータを開発できると期待されています。